

Teilchen

Felder

Universum

Technologien

1895

e^-

Brownsche Bewegung

Elektromagnetismus Schwache WW Starke WW

Photon

Radioaktivität

3

4

Detektor

Beschleuniger

1900

Atom

Spezielle Relativität

1905

1910

Kern

Quantenmechanik
Welle-Teilchen Dualismus
Spin/Fermion-Boson

1920

p^+

Höhenstrahlung

Allgemeine Relativität

Geiger

Wolken

1930

e^+

n

Antimaterie

Fermi Theorie

Yukawa
 π Austausch

Galaxien;
Ausdehnung des Universums

Zyklotron

1940

μ^-

Dunkle Materie

Kernfusion

1950

τ^-

p^-

π
Teilchenzoo

QED

P, C, CP Verletzung

Big Bang Nukleosynthese

Blasenkammer

Synchrotron

1960

ν_e

ν_μ

u d s

Higgs

W Bosons

Kosmische Hintergrundstrahlung

e^+e^- Ring

1970

c

GUT

EW Vereinigung

QCD Farbladung

Prozessrechner

Strahlkühlung

1975

τ^-

STANDARD MODEL

SUSY

Inflation

p^+p^- Ring

1980

b

Superstrings

W

Z

g

Inhomogenität der Hintergrundstrahlung (COBE, WMAP)

Moderne Detektoren

WWW

1990

t

3 Teilchenfamilien

Dunkle Energie

GRID

2000

ν_τ

ν Masse

2010

**Zurück zum Anfang des 20. Jahrhunderts:
eine andere Wechselwirkung war entdeckt worden**

Die "schwache Wechselwirkung"

1895: Wilhelm Röntgen entdeckt die 'Röntgenstrahlung'

1896: Henri Becquerel entdeckt Strahlung von Uran-Kristallen

1898: Marie and Pierre Curie : ionisierende Strahlung von 'Pechblende' (U + Polonium)

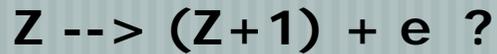
Radioaktivität

Es dauerte ca. 35 Jahre, um diese Phänomene grob zu verstehen

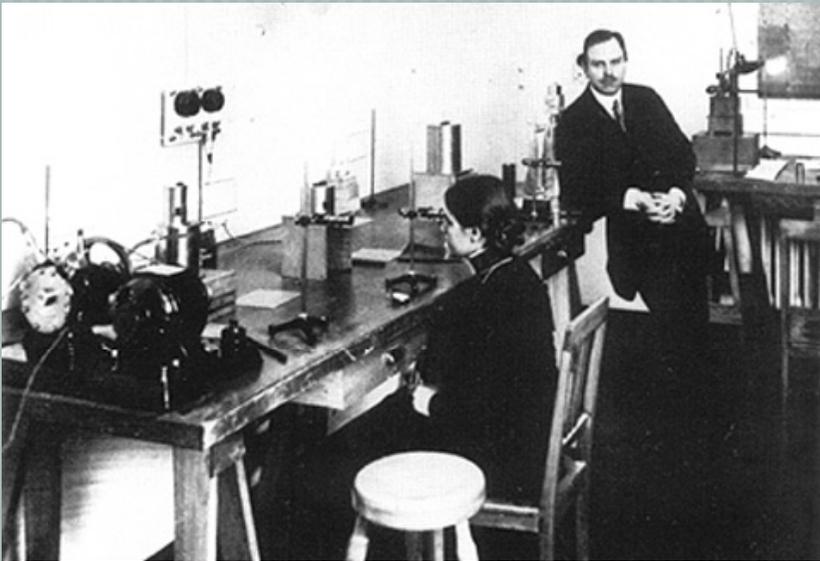
Felder

'Schwache' Wechselwirkung

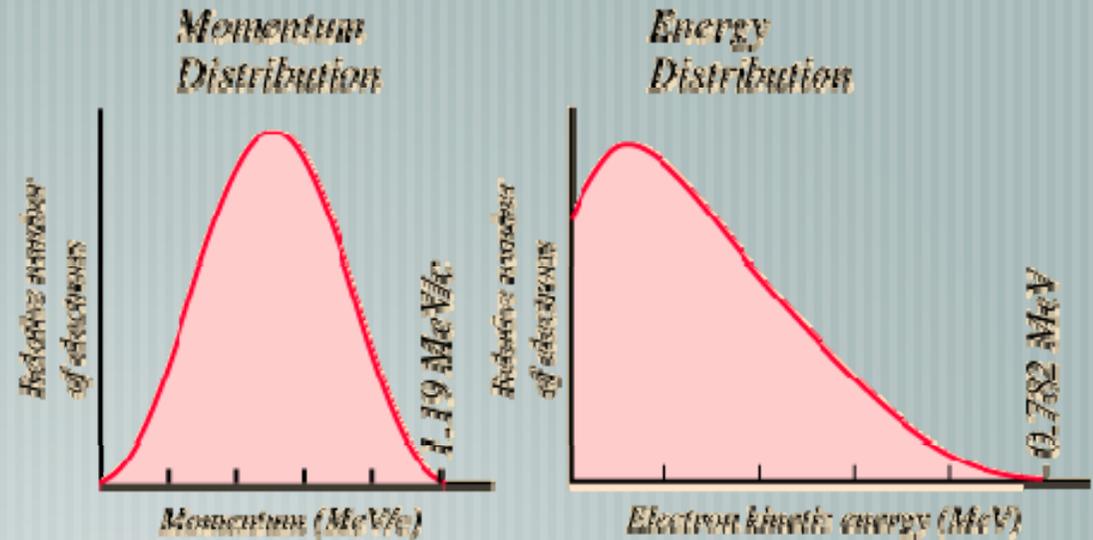
Beta-Zerfall von Atomkernen - warum wurden Elektronen mit einem kontinuierlichen Energiespektrum emittiert?



Verletzung der Energieerhaltung ?

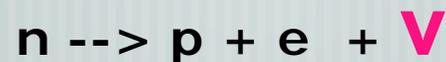


1911 Lise Meitner, Otto Hahn



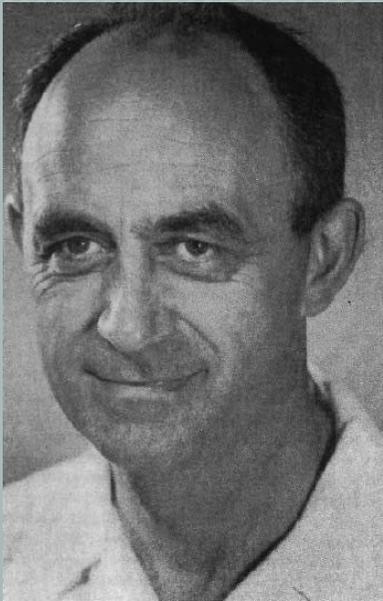
1930 Wolfgang Pauli: an **extremely light neutral particle*** is emitted in beta decay

*'neutron', but in 1931 Fermi called it "neutrino" (little neutron)

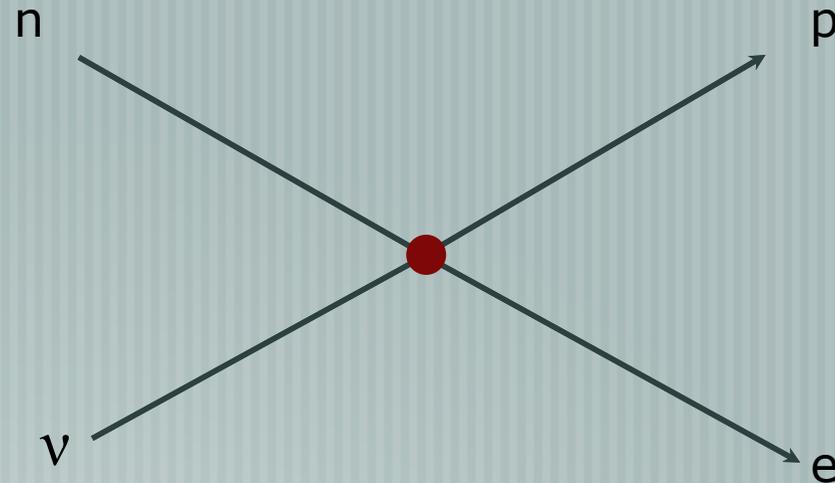


Felder

'Schwache' Wechselwirkung



Enrico Fermi
(1934)



'Phänomenologische' Beschreibung der schwachen Wechselwirkung

Wechselwirkung findet in einem Punkt statt

Stärke: $G_F \sim 10^{-5}$ relativ zur elektromagnetischen WW

Analogie zu zwei Teilchen'strömen' (Proton-Neutron / Elektron-Neutrino)

Ok bis ~1958

Felder

'Starke' Wechselwirkung

Was hält Protonen und Neutronen im Kern zusammen

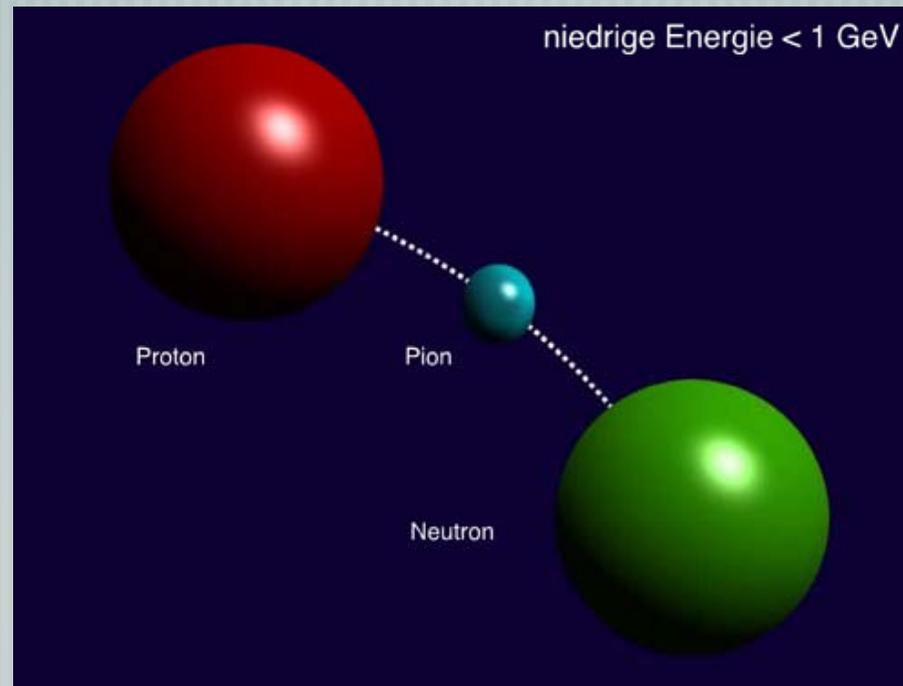


Yukawa (1934)

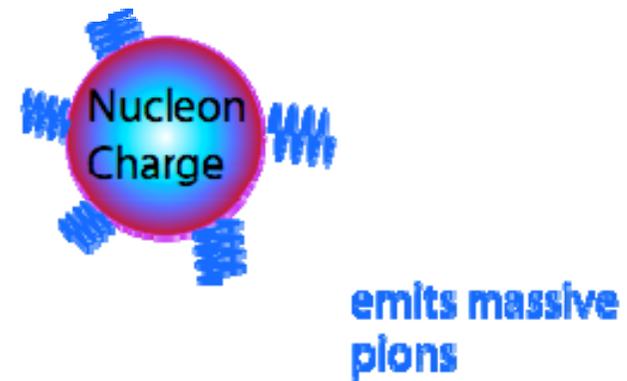
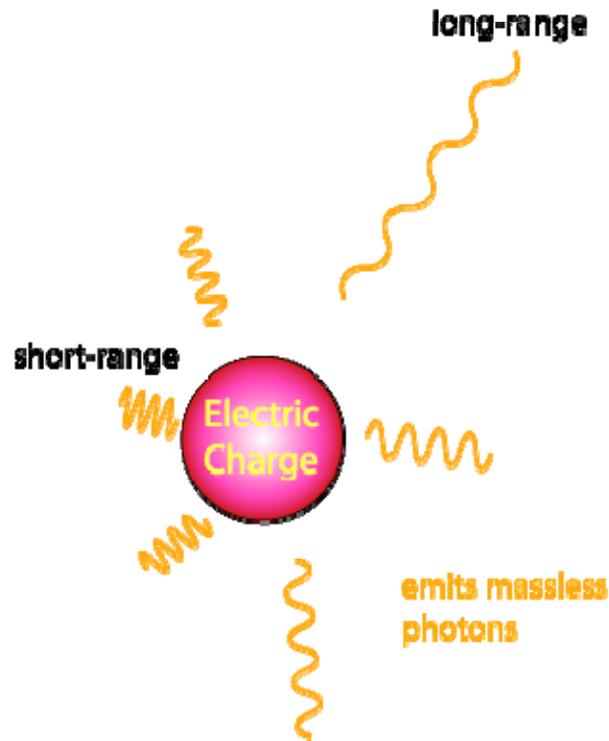
- 1) Die Kraft muss stärker als die elektromagnetische Kraft sein
- 2) Kurze Reichweite ($\sim 1-2$ fm), um die Grösse des Atomkerns zu erklären

Yukawa's idea:

ein Teilchen mit einer 'mittelgrossen' Masse vermittelt diese
'starke' Kraft (das 'Pion')



Elektromagnetische vs 'Starke' WW



$$\Delta E \Delta t \geq \hbar \quad (\Delta E \sim m)$$

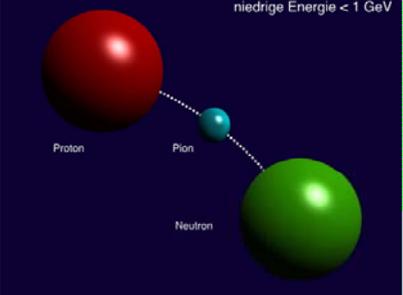
$$r = c \Delta t = \frac{\hbar c}{m} \sim \frac{200 \text{ MeV fm}}{m}$$

$$V(r) = -e^2 \frac{1}{r}$$

Coulomb law

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-mr}}{r}$$

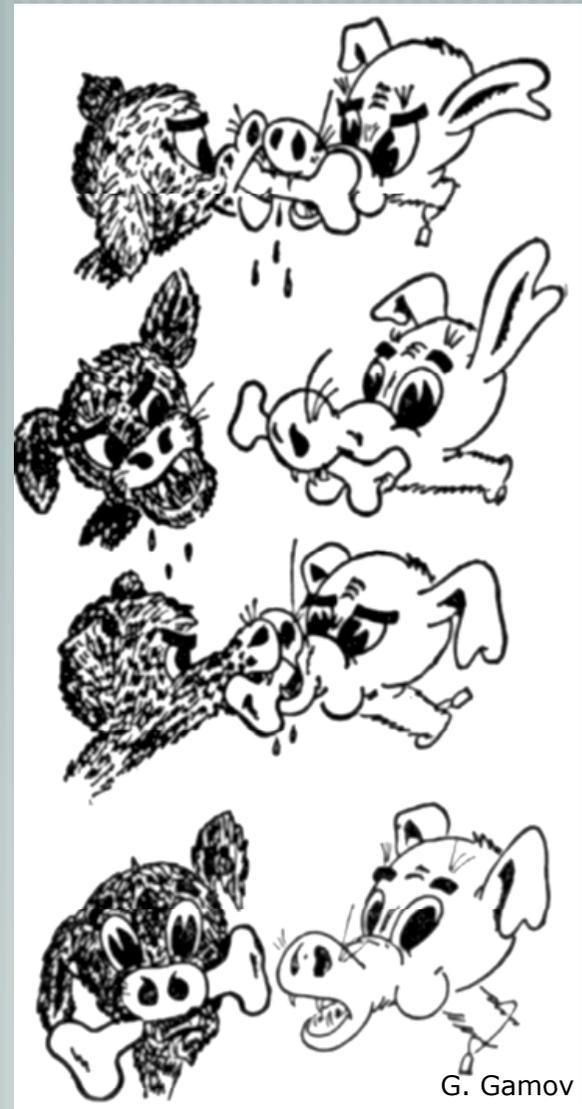
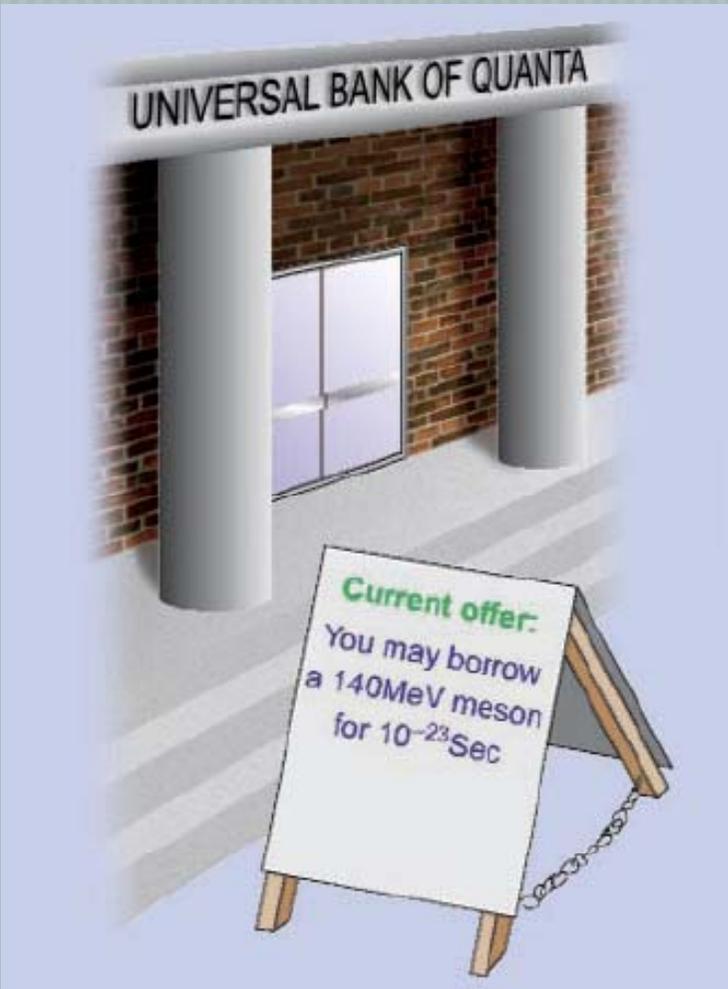
Yukawa potential ~ Modified "Coulomb" law



Felder

'Starke' Wechselwirkung

Analogien zum 'Austauschkraften'

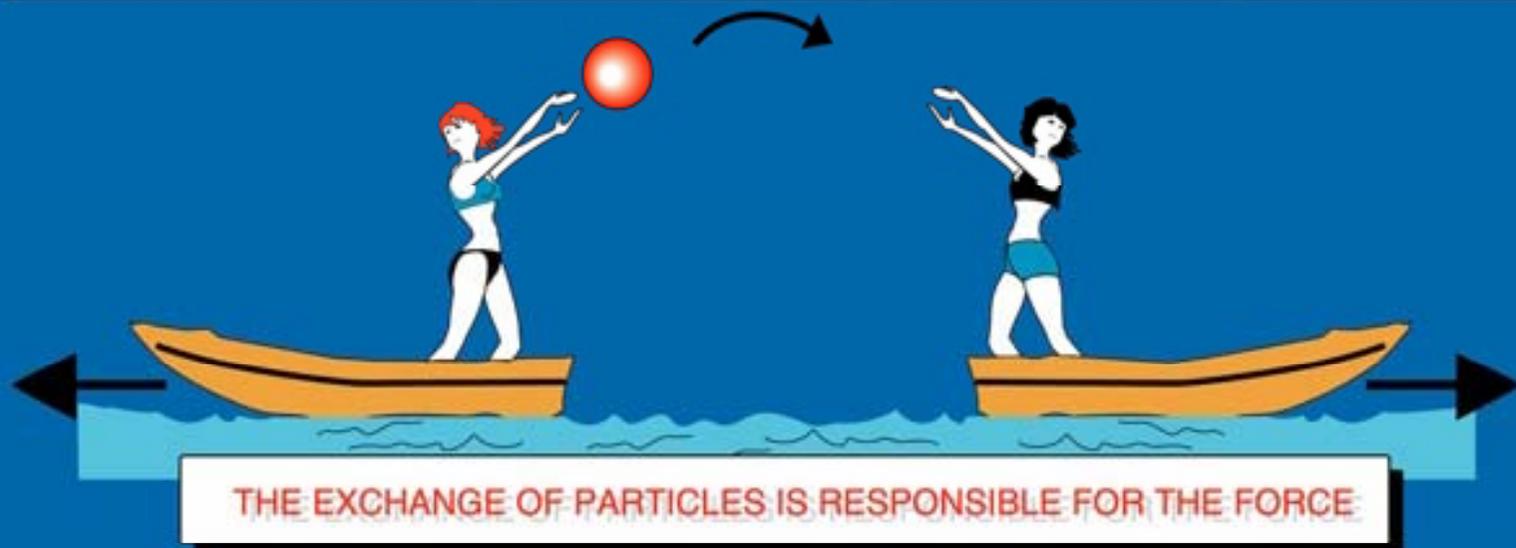


G. Gamov

Unschärferelation: 1.4 fm ~ 140 MeV

The forces in Nature

TYPE	INTENSITY OF FORCES (DECREASING ORDER)	BINDING PARTICLE (FIELD QUANTUM)	OCCURS IN :
STRONG NUCLEAR FORCE	~ 1	GLUONS (NO MASS)	ATOMIC NUCLEUS
ELECTRO -MAGNETIC FORCE	$\sim 10^{-3}$	PHOTONS (NO MASS)	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	$\sim 10^{-5}$	BOSONS Z^0, W^+, W^- (HEAVY)	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	GRAVITONS (?)	HEAVENLY BODIES



4

Das Universum

Vor dem 20. Jahrhundert schien das Universum ein ruhiger Platz zu sein.
Es war da nicht viel los.

Die meisten Physiker glaubten das Universum sei unendlich in Raum und Zeit.

Aber es gab da eine merkwürdige Beobachtung

Nachts ist es dunkel

Das konnte nicht mit einem unendlichen grossen und unendlich alten Universum
erklärt werden

Olber's "Paradox"

Heinrich Wilhelm Olbers (1823)

Wenn das Universum unendlich gross und gleichförmig mit leuchtenden Sternen gefüllt ist, dann wird man in jeder möglichen Blickrichtung irgendwo auf die Oberfläche eines Sterns blicken.

Quantitativ:

Jede Schale trägt mit ihrer Oberfläche bei $\sim r^2$

Die Lichtintensität nimmt ab mit $\sim 1/r^2$

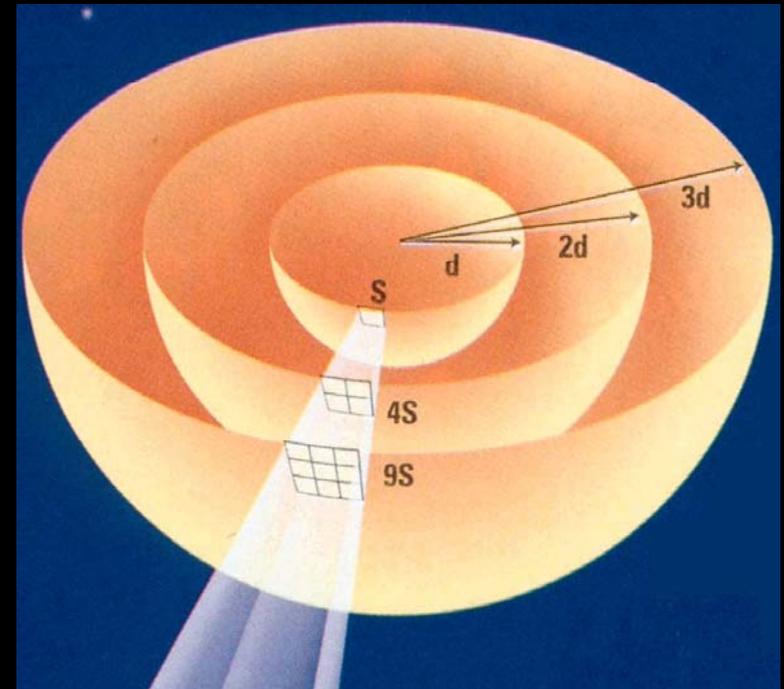
Beitrag jeder Schale zur Gesamtintensität = constant

Konsequenz:

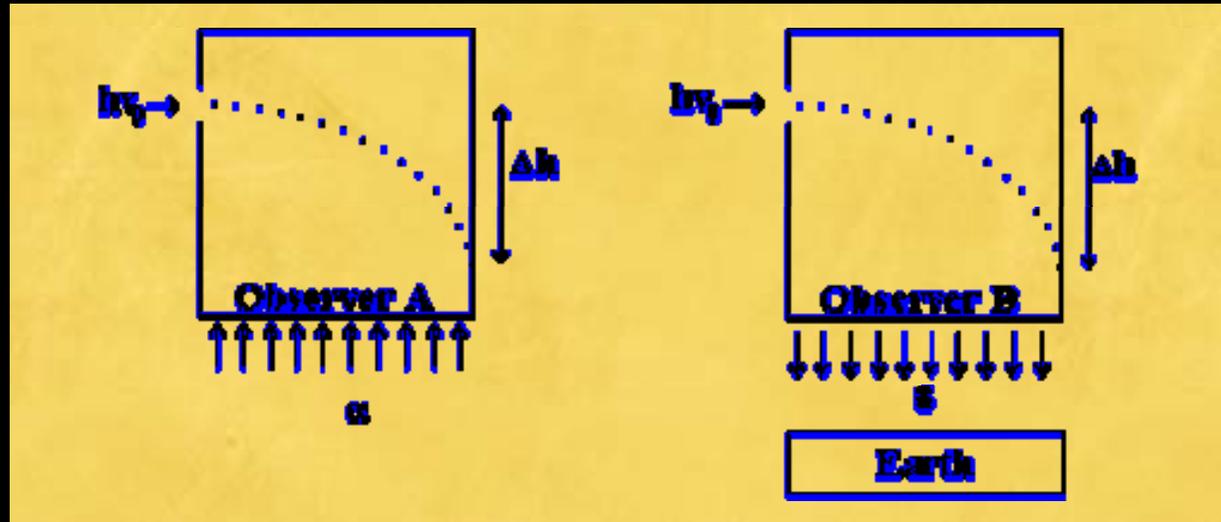
Das Universum ist nicht unendlich alt, oder ...

Das Universum ist nicht unendlich gross, oder...

Beides



Äquivalenzprinzip (Einstein, 1907)



Beschleunigung (träge Masse) ist ununterscheidbar von
Gravitation (schwere Masse)

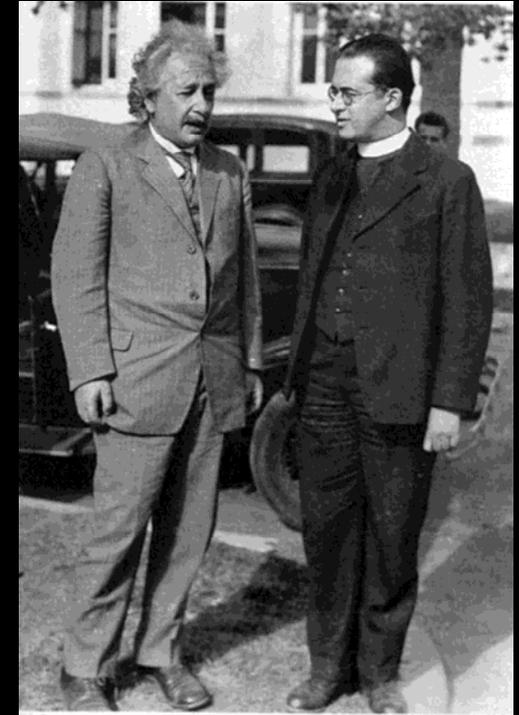
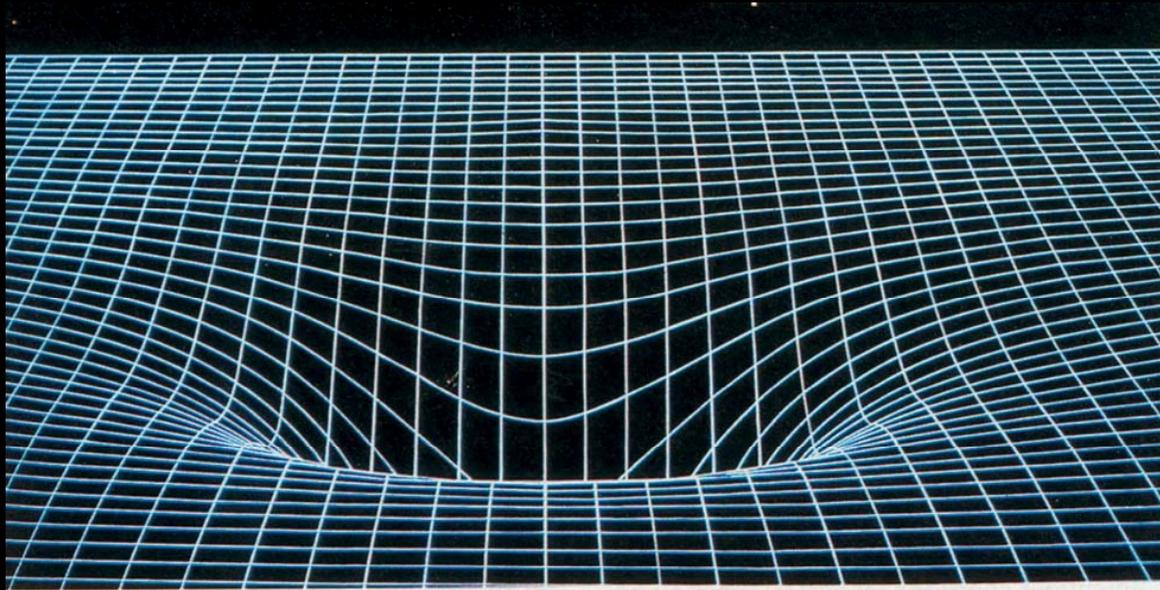
"Der glücklichste Gedanke meines Lebens" (Albert Einstein)

Aufzugbeispiel: Licht breitet sich auf einer parabolischen Kurve aus.
Äquivalenzprinzip: in einem Gravitationsfeld wird Licht auch abgelenkt.

Da Lichtstrahlen den kürzest-möglichen Weg im Raum definieren -->
Raum (und Zeit) werden durch Gravitationsfelder gekrümmt

Albert Einstein (1912-15) :
Allgemeine Relativitätstheorie

Die Materie bewirkt die Krümmung des Raums
Der Raum bestimmt die Bewegung der Materie



George Lemaitre (1927)

Expandierendes Universum ?

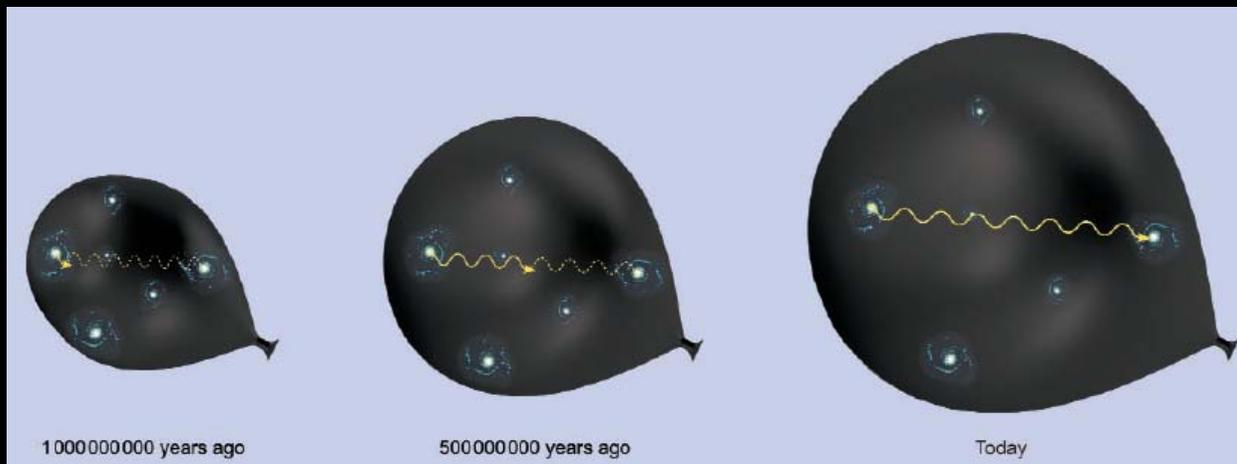
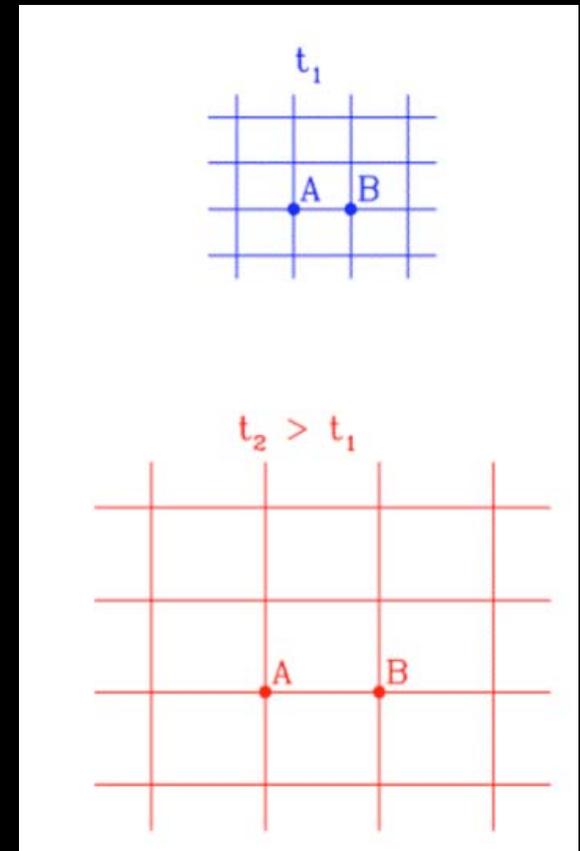
1915

Friedmann beschrieb eine mögliche Lösung der Einstein-Gleichungen - ein expandierendes Universum

$$r_{AB}(t) = a(t)x_{AB}$$

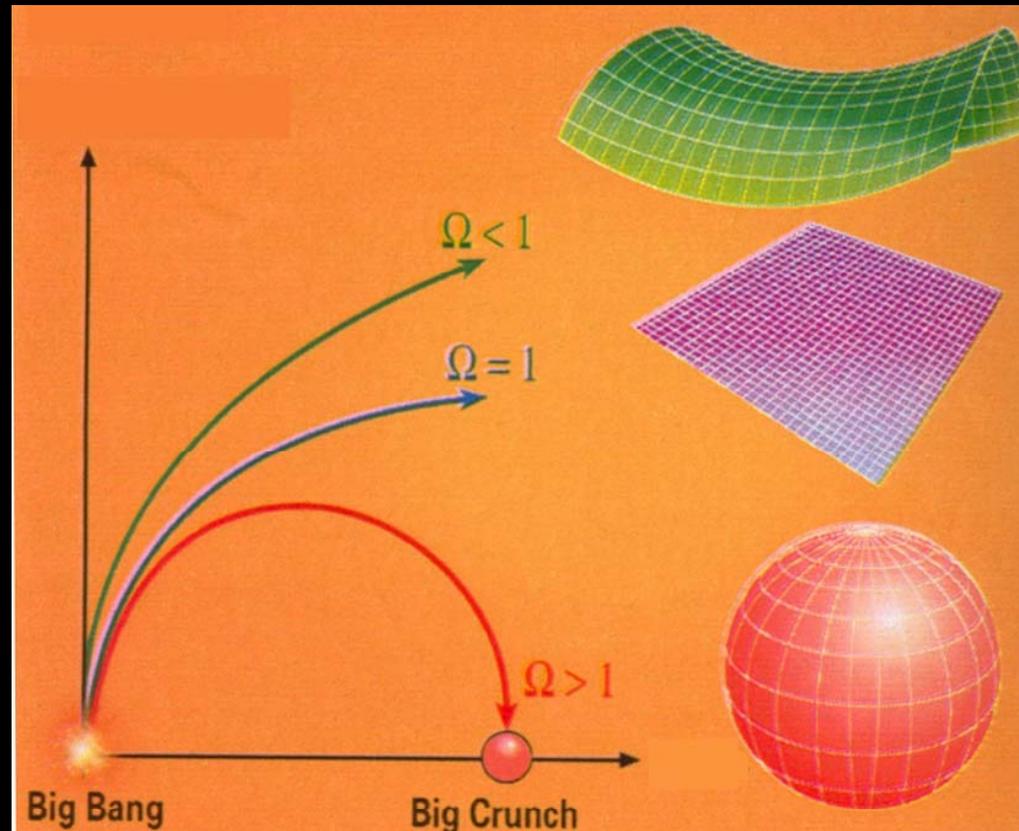
Seine Gleichung verbindet die durchschnittliche Energiedichte " ρ " und den Krümmungsfaktor K mit der Expansionsrate $a(t)$

$$\left(\frac{1}{a} \frac{da}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \bar{\rho} - \frac{K}{a^2}$$



Universum

Eine Frage war die Gesamtmasse des Universums. Im Prinzip kann das irgendeine Zahl sein. Entscheidend ist aber die 'kritische Energiedichte'. Falls die durchschnittliche Energiedichte im Universum kleiner ist, wird das Universum für immer expandieren. Ist sie aber grösser, dann wird das Universum eines Tages wieder in sich zusammenfallen ('big crunch').



Universum

Einstein mochte die Idee eines 'dynamischen' Universums überhaupt nicht.

Er glaubte an ein ewiges und statisches Universum.

Aber seine eigenen Gleichungen sagten etwas anderes voraus.

Deshalb entschied er sich, an seiner Gleichung herumzupfuschen, und fügte eine sogenannte 'kosmologische Konstante' ein.

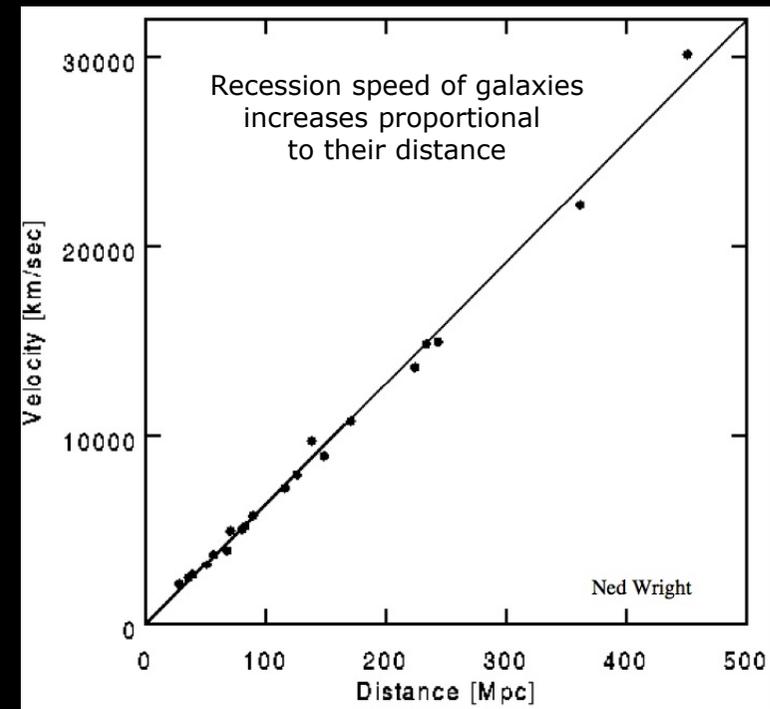
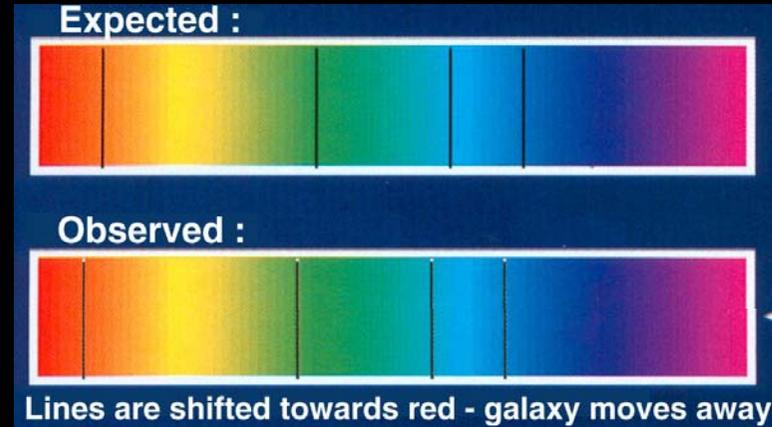

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 - \frac{8}{3}\pi G\rho - \frac{1}{3}\Lambda c^2 = -\frac{kc^2}{R^2}$$

Das Universum expandiert !

1929



Edwin Hubble (1929)
Mt. Palomar telescope



Einstein gibt zu: die kosmologische Konstante war 'seine grösste Eselei'

Universum

Die systematische Beobachtung von vielen Sternen in anderen Galaxien enthüllte eine erstaunliche Tatsache:

Das Universum sieht in **allen Richtungen und allen Entfernungen genau gleich** aus:

Hydrogen ~ 75 %

Helium-4 ~ 25 %

He-3 ~ 0.003 %

Deuterium ~ 0.003 %

Li-7 ~ 0.00000002 %

Dafür musste es einen Grund geben ...

1948: Das 'Big Bang' Modell* vom Anfang des Universums



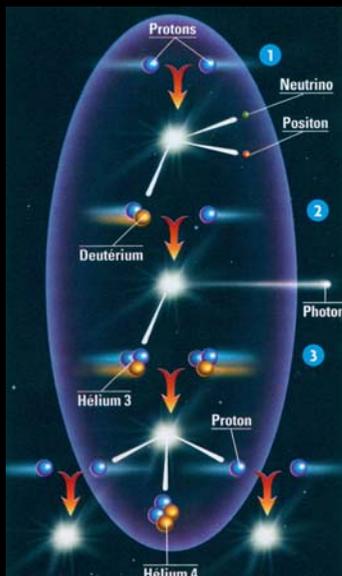
George Gamov

Das Universum entstand aus einem extrem heißen Anfangszustand

Es dehnte sich dann schnell aus, wobei es abkühlte

In der Anfangsphase war das Universum mit Strahlung gefüllt

Aus dieser Strahlung materialisierten die Elementarteilchen



- In den ersten drei Minuten war nur Zeit für die Fusion der leichtesten Atomkerne
- Es sollte ein 'Echo' des Urknalls geben: eine homogene Hohlraumstrahlung mit einer Temperatur von ca. 5 K

* The name 'Big Bang' was used by Fred Hoyle to ridicule Gamov's idea. Later Fred Hoyle was ridiculed.

Teilchen

Felder

Universum

Technologien

1895

e^-

Elektromagnetismus Schwache WW Starke WW

Detektor

Beschleuniger

1900

Brownsche Bewegung

Photon

Radioaktivität

1905

Atom

Spezielle Relativität

1910

Kern

1920

p^+

Quantenmechanik
Welle-Teilchen Dualismus
Spin/Fermion-Boson

Höhenstrahlung

Allgemeine Relativität

Geiger

Wolken

1930

e^+

n

Antimaterie

Fermi Theorie

Yukawa
 π Austausch

Galaxien;
Ausdehnung des Universums

Zyklotron

1940

5

Teilchen-zoo

τ^-

ν_e

ν_μ

π

p^-

u d s

c

b

t

6

QED

P, C, CP Verletzung

Higgs

W Bosons

EW Vereinigung

GUT

GUT

Superstrings

QCD Farbladung

W Z g

3 Teilchenfamilien

Dunkle Materie

Kernfusion

Big Bang Nukleosynthese

Synchrotron

1950

τ^-

ν_e

ν_μ

Blasenkammer

1960

ν_e

ν_μ

Kosmische Hintergrundstrahlung

e^+e^- Ring

1970

ν_e

ν_μ

Prozessrechner

Strahlkühlung

1975

ν_e

ν_μ

ν_τ

Inflation

p^+p^- Ring

1980

ν_e

ν_μ

ν_τ

Inhomogenität der Hintergrundstrahlung (COBE, WMAP)

Moderne Detektoren

WWW

1990

ν_e

ν_μ

ν_τ

2000

ν_e

ν_μ

ν_τ

ν Masse

Dunkle Energie

GRID

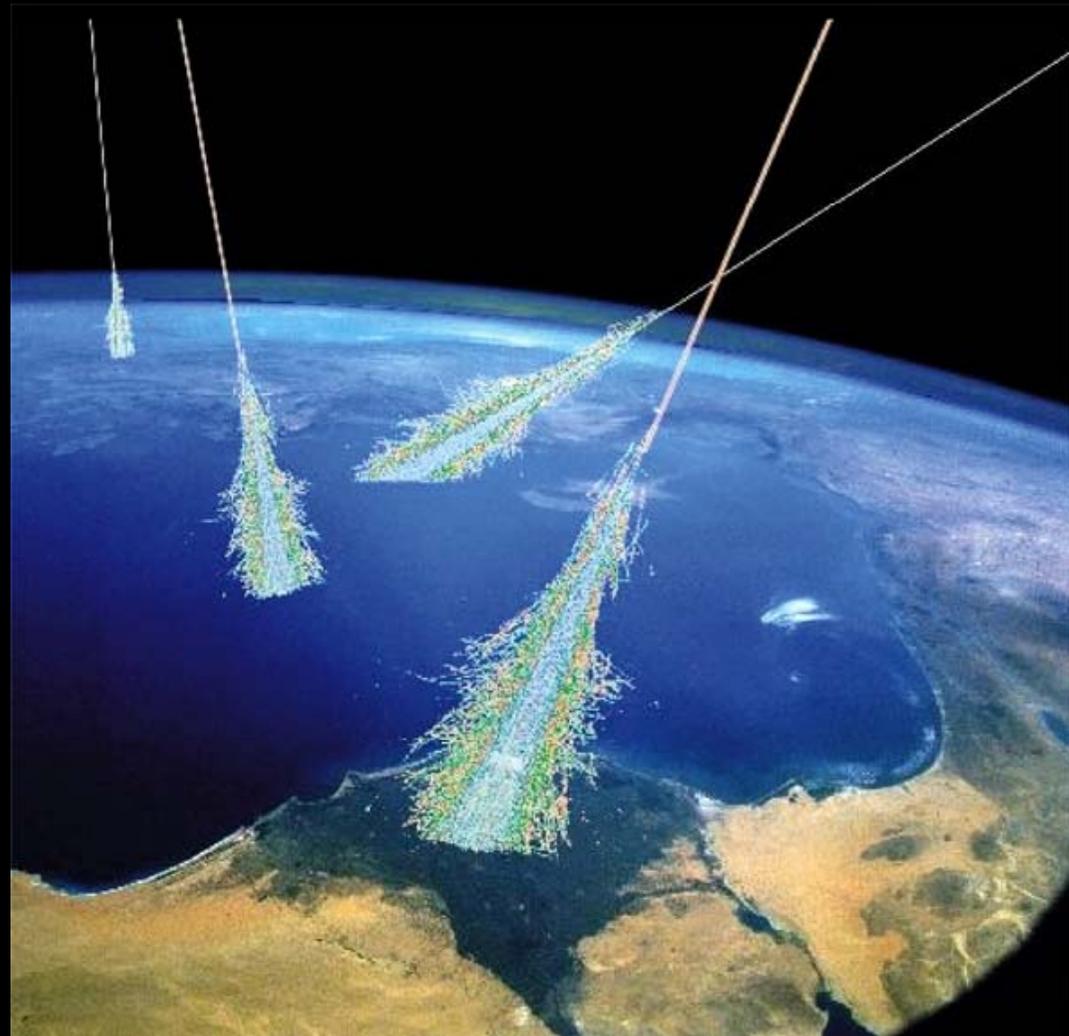
2010

Im Jahr 1913 gab es die ersten Hinweise auf ein nicht ganz so ruhiges Universum

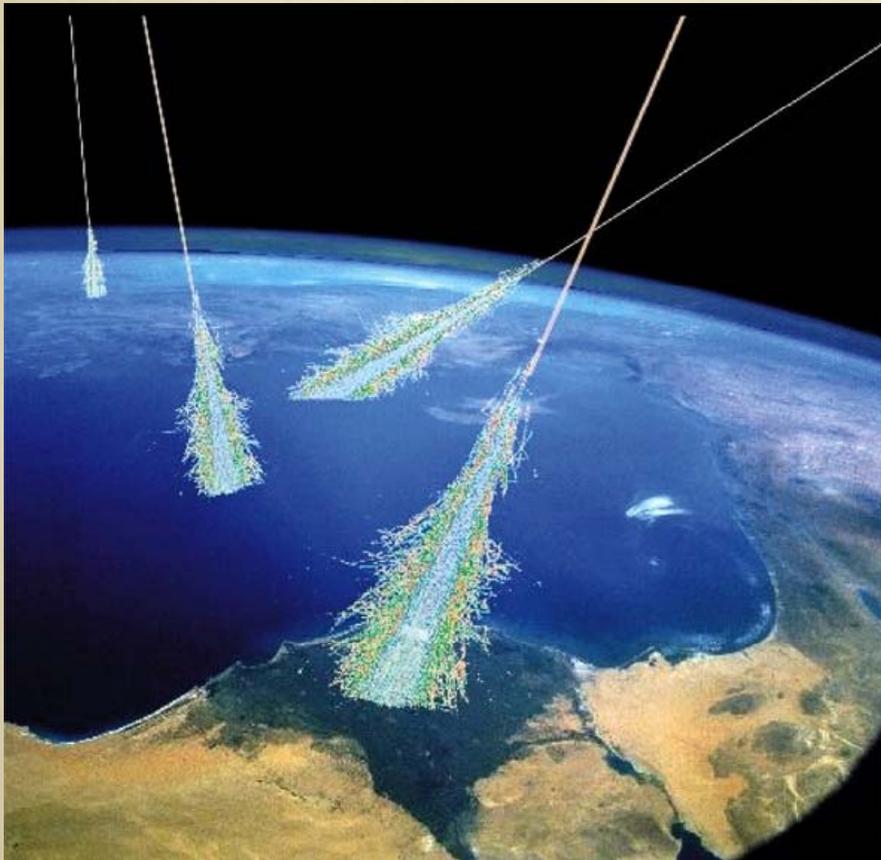
Entdeckung der kosmischen Strahlung



Victor Hess



Yukawa's 'Pion' (1934): jeder suchte jetzt nach einem Teilchen mit Masse 100-200 MeV.
Es gab aber (noch) keine Beschleuniger mit hinreichender Energie.
Deshalb kletterten Teilchenphysiker auf Berggipfel mit ihren photographischen Emulsionen.



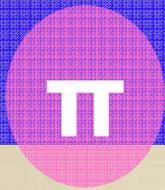
Ein neues Teilchen im richtigen Massenbereich wurde entdeckt

Aber: lange Reichweite in Materie !! ?

Das konnte nur bedeuten, dass dieses Teilchen nicht an der starken Wechselwirkung teilnahm - es konnte also kein Pion sein.

Muon = 'schweres Elektron' ($206 \times m_e$)

I. Rabi: "WER HAT DAS BESTELLT?"



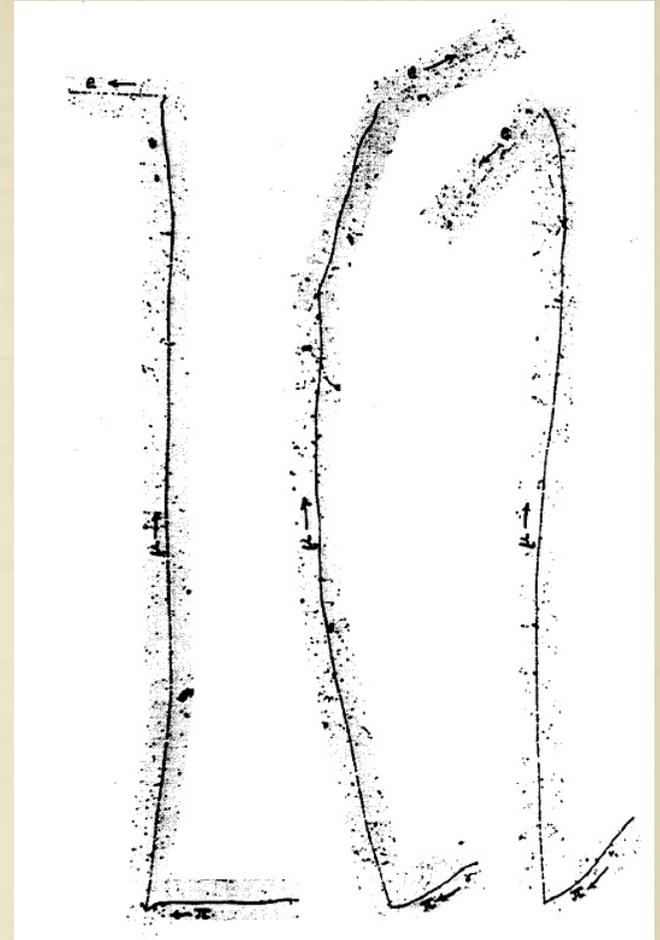
1947: Entdeckung des (geladenen) Pions



Scanned at the American Institute of Physics

Cecil Powell

Ouff!



Photographische Emulsion

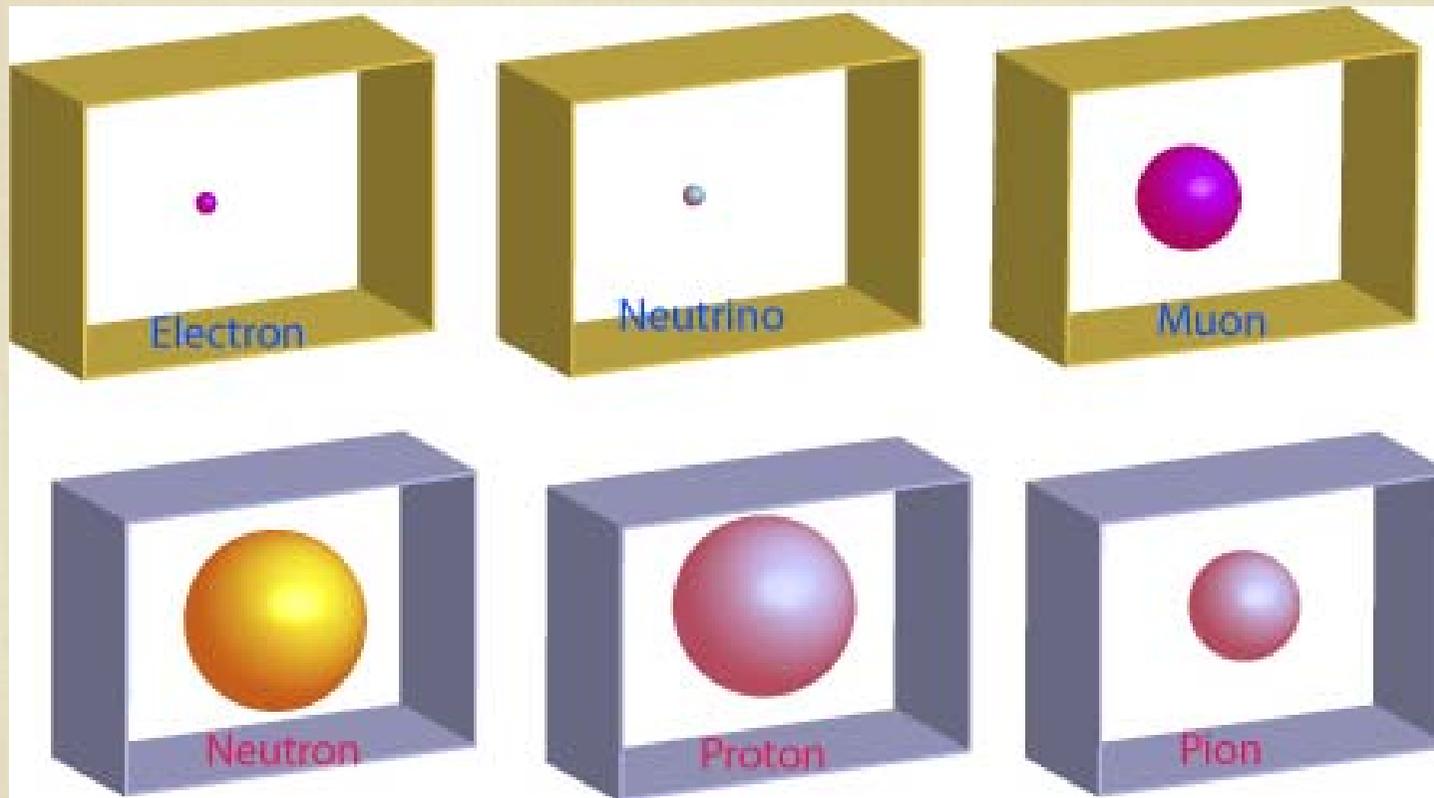
Kosmische Strahlen in **grosser Höhe** (Pic du Midi, Pyrenees)

Pionenspuren wurden im Mikroskop identifiziert

1948: Pionen am Berkeley Zyklotron produziert

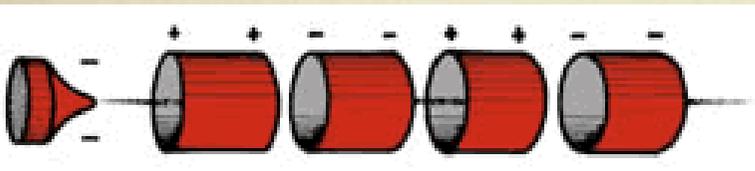
TEILCHENSPEKTRUM

1948





Rolf Wideroe, 1928



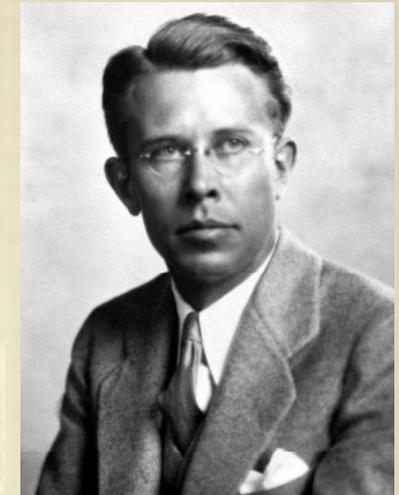
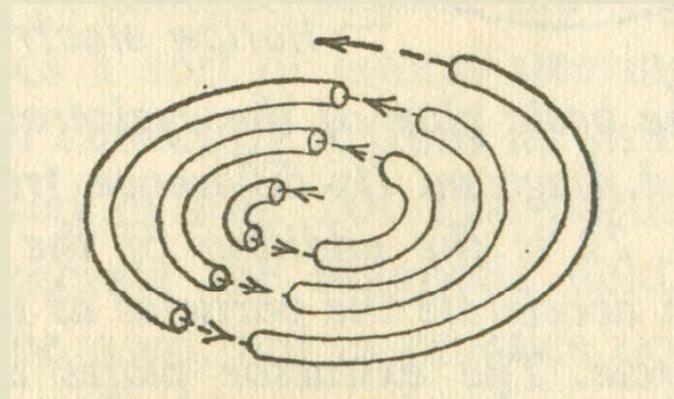
Linearbeschleuniger

Beschleunigung der Teilchen in den Räumen zwischen den Elektroden
Die Beschleunigungsfrequenz wird der Bewegung der Teilchen angepasst

Beschleuniger

"Kosmische Strahlung aus Menschenhand"

Ernest Lawrence, 1931



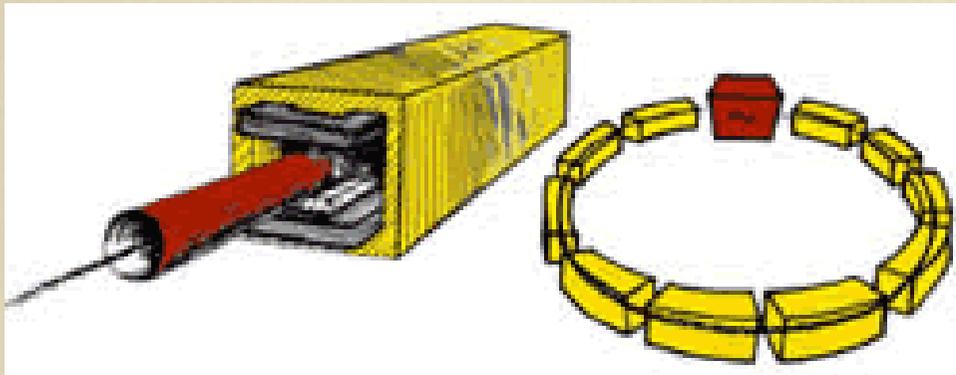
Zyklotron

Ein Magnetfeld zwingt Teilchen auf eine Kreisbahn;
Teilchen werden durch elektrische Felder in den Zwischenräumen beschleunigt

- 1931: 80 keV
- 1932: 1000 keV
- 1939: 19 MeV*
- 1946: 195 MeV ("synchrocyclotron")

* erste Probleme mit relativistischer Massenvergrößerung

Beschleuniger (2)



Synchrotron

Ähnlich dem Zyklotron, aber man ändert das magnetische Feld so dass die Teilchen auf einer Kreisbahn mit konstantem Radius bleiben (hilft auch bei der relativistischen Massenvergrößerung)

1947 (US) Synchrotron-Beschleuniger

Brookhaven (1952) - 3 GeV

Berkeley (1954) - 6.2 GeV ('antiproton')

1954: Europa steigt ins Rennen ein

CERN (1959) - 24 GeV

Brookhaven (1960) - 30 GeV

Detektoren

Geigerzähler
Nebelkammern
Emulsionen
Blasenkammer

Cerenkov Detektoren
Photomultiplier
Funkenkammern

Nach 1967:

Drahtkammern
Driftkammern
Kalorimeter

Teilchen zoo

Mit den neuen Beschleunigern und Detektoren wuchs die Zahl der bekannten 'Elementarteilchen' auf mehr als 200 an - der 'Teilchenzoo'

π^+ π^- π^0

Pions

K^+ K^- K^0

η'

Kaons

Eta-Prime

η

Eta

ψ

ρ^+ ρ^- ρ^0

Rho

Phi

Mesonen

Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 , Δ^-

Delta

Λ^0

Σ^+ , Σ^0 , Σ^-

Lambda (strange!)

Sigma (strange!)

Ξ^0 , Ξ^-

Sigma(very strange!)

Baryonen

Gab es eine Sub-Struktur dieser Teilchen ?

SU(3) - Ein Klassifizierungsschema mit 'quarks'

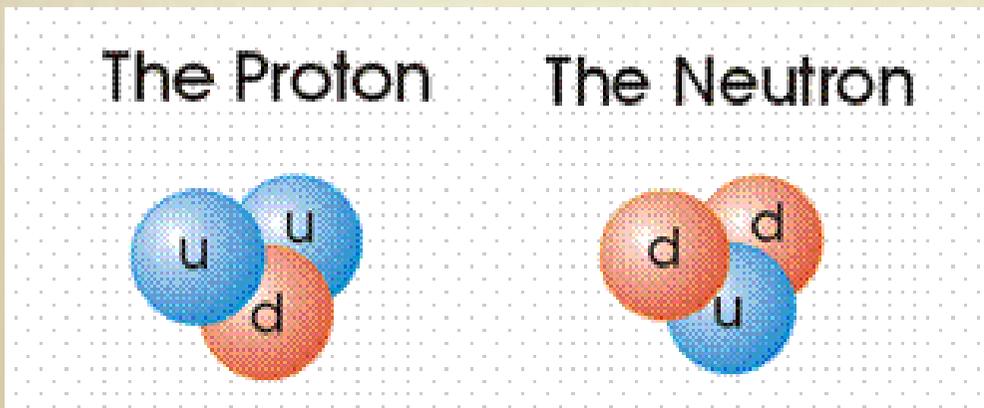
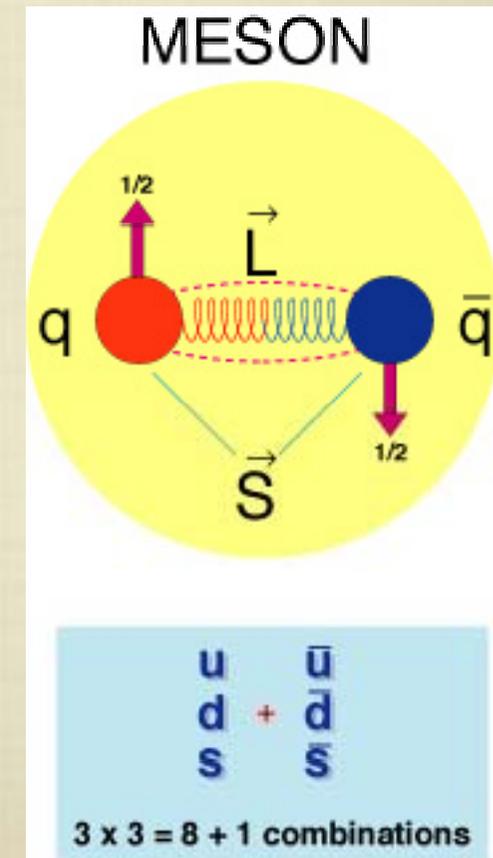
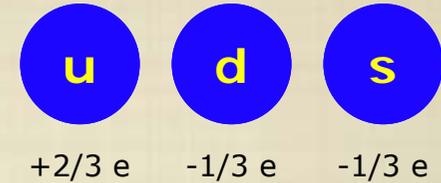


Fig. 6.35 Murray Gell-Mann (b.1929).

Gell-Mann, 1963

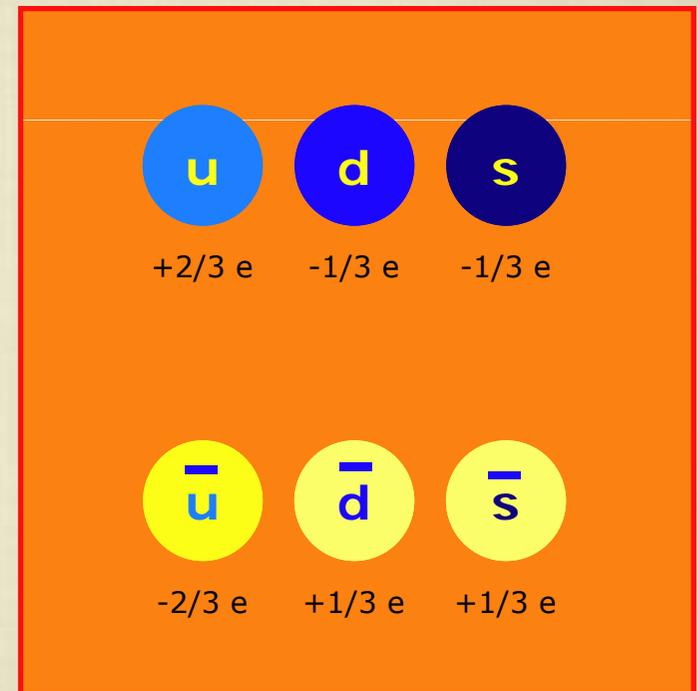
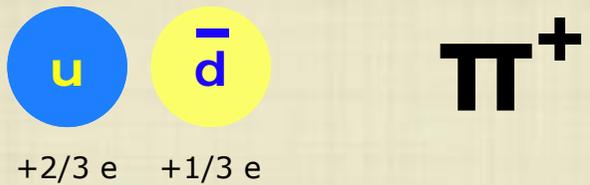
(G. Zweig, 1963, CERN)

- 1) 3 Arten von "quarks" : up, down, strange
- 2) Mit elektrischer Ladung: $+2/3$, $-1/3$, $-1/3$
- 3) Nur bestimmte Kombinationen möglich:
 Meson = quark+antiquark
 Baryon = quark(1) + quark(2) + quark(3)

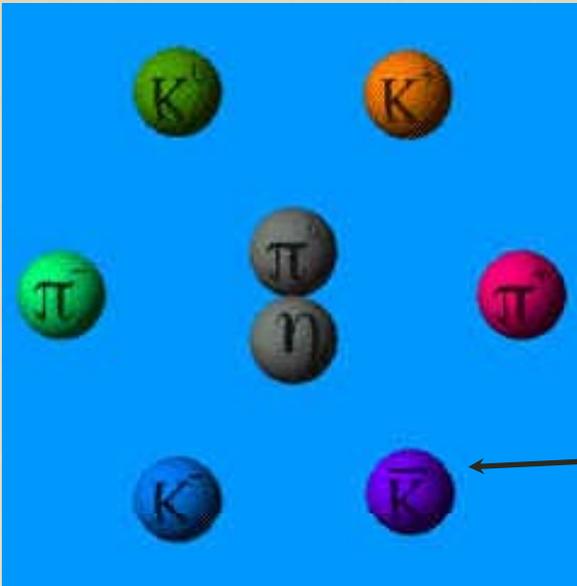
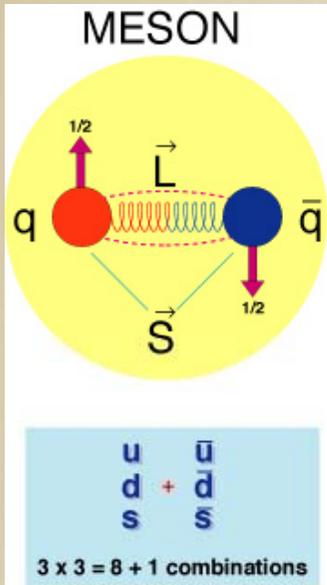


TEILCHENSPEKTRUM

Einige der bekannteren Mesonen (quark+antiquark):



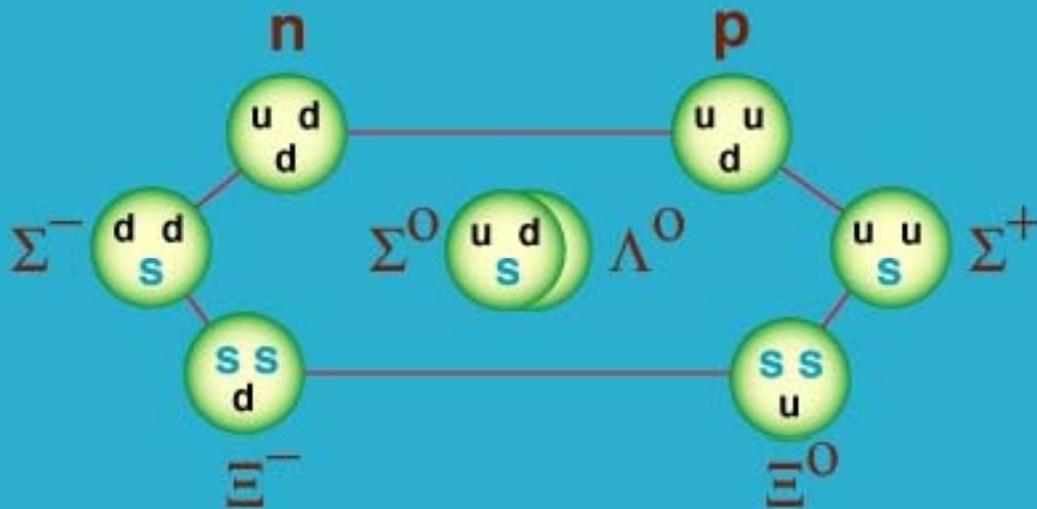
TEILCHENSPEKTRUM



← Pion, Eta-meson

← Kaonen besitzen ein 'strange' Quark

SPIN 1/2 BARYON OCTET

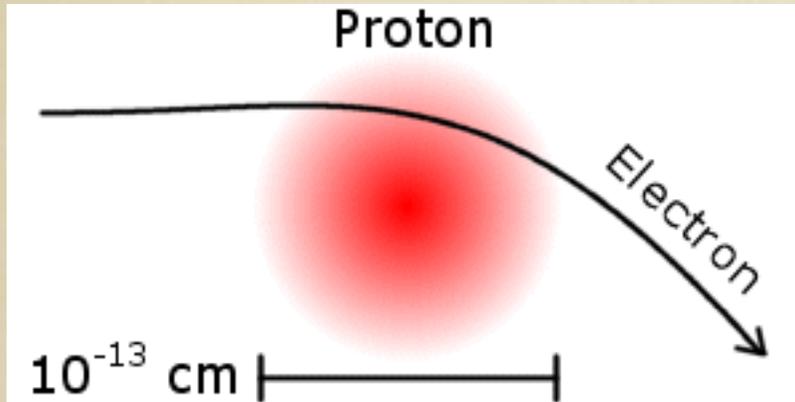


Die leichtesten Baryonen:
 Proton, Neutron;
 Lambda, Sigma, Xi

TEILCHENSPEKTRUM

Entdeckung der Quarks

Elektronenstreuung an Protonen

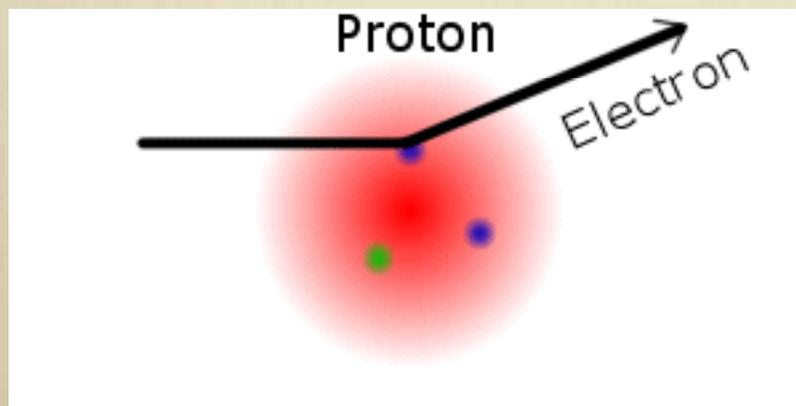


1956 Hofstadter: Messung des Protonenradius



Stanford Linear Accelerator Centre

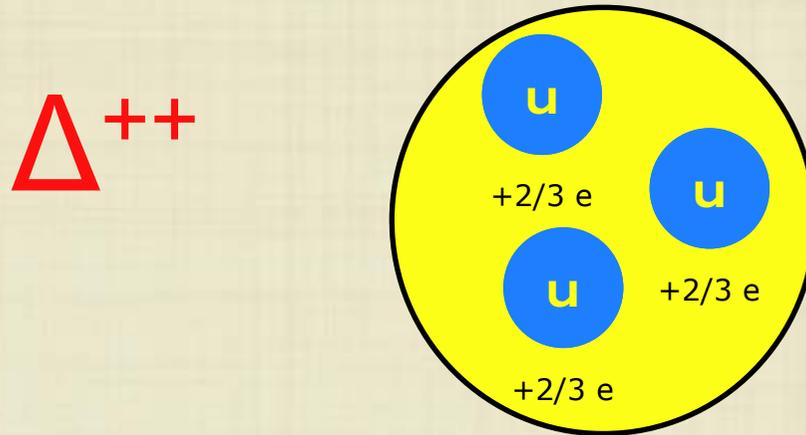
1967 Friedmann, Kendall, Taylor (SLAC): ~ Rutherford experiment mit Elektronen
--> es gibt drei 'harte' (punktförmige) Streuzentren im Proton



Die gemessenen Querschnitte waren perfekt mit der Anwesenheit von 2 up- und 1 down-quark im Proton erklärbar.

Was hält die Quarks im Proton zusammen? Das Konzept der 'Farbladung'

PROBLEM: 'Fermionen' (Spin 1/2 - Teilchen wie z.B. Quarks) können nicht im gleichen Quantenzustand koexistieren (Pauli Prinzip)



In diesem Baryon (Delta++) musste es drei identische Quarks (up) mit parallelem Spin in einem symmetrischen Zustand geben.

Die drei Quarks müssen sich zumindest in einer Quantenzahl unterscheiden:
"colour"

(Bardeen, Fritsch, Gell-Mann)

TEILCHENSPEKTRUM

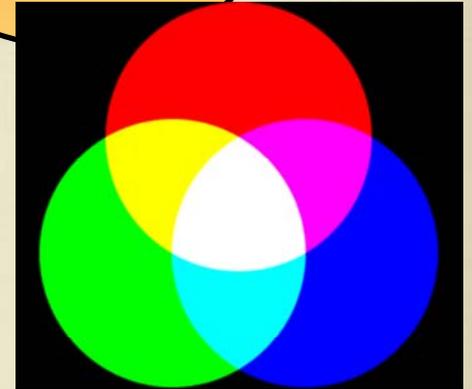
Quantum Chromo Dynamics

Theorie der starken 'Farb'wechselwirkung in Analogie zur QED

QCD: 3 verschiedene Ladungen ("colour") [rot, grün, blau]*

'Starke Ladung' zwischen Quarks wird von (8) Gluonen übertragen

hat nichts mit den
Farben des Lichts zu
tun; nur eine Analogie



Dogma der QCD: Nur farb-neutrale Zustände können existieren

MESONS = Quark-Antiquark

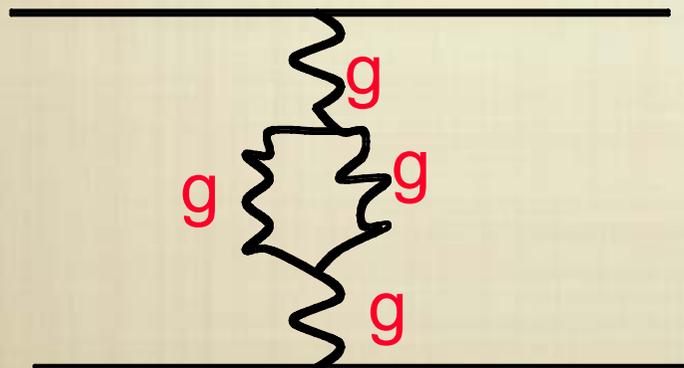
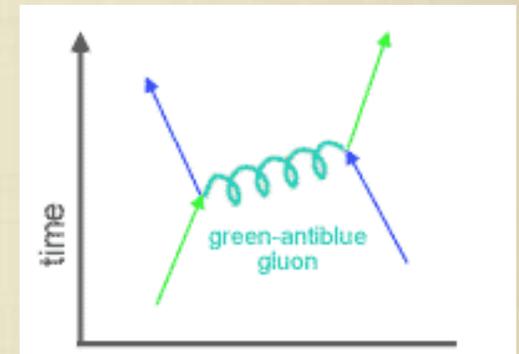
BARYONS = 3-Quark Zustände

Gluonen

GLUONEN sind selbst auch geladen - GLUON-GLUON WECHSELWIRKUNG !



- Träger der starken Wechselwirkung
- haben keine Masse
- $3 \times 3 - 1 = 8$ verschiedene Gluonen



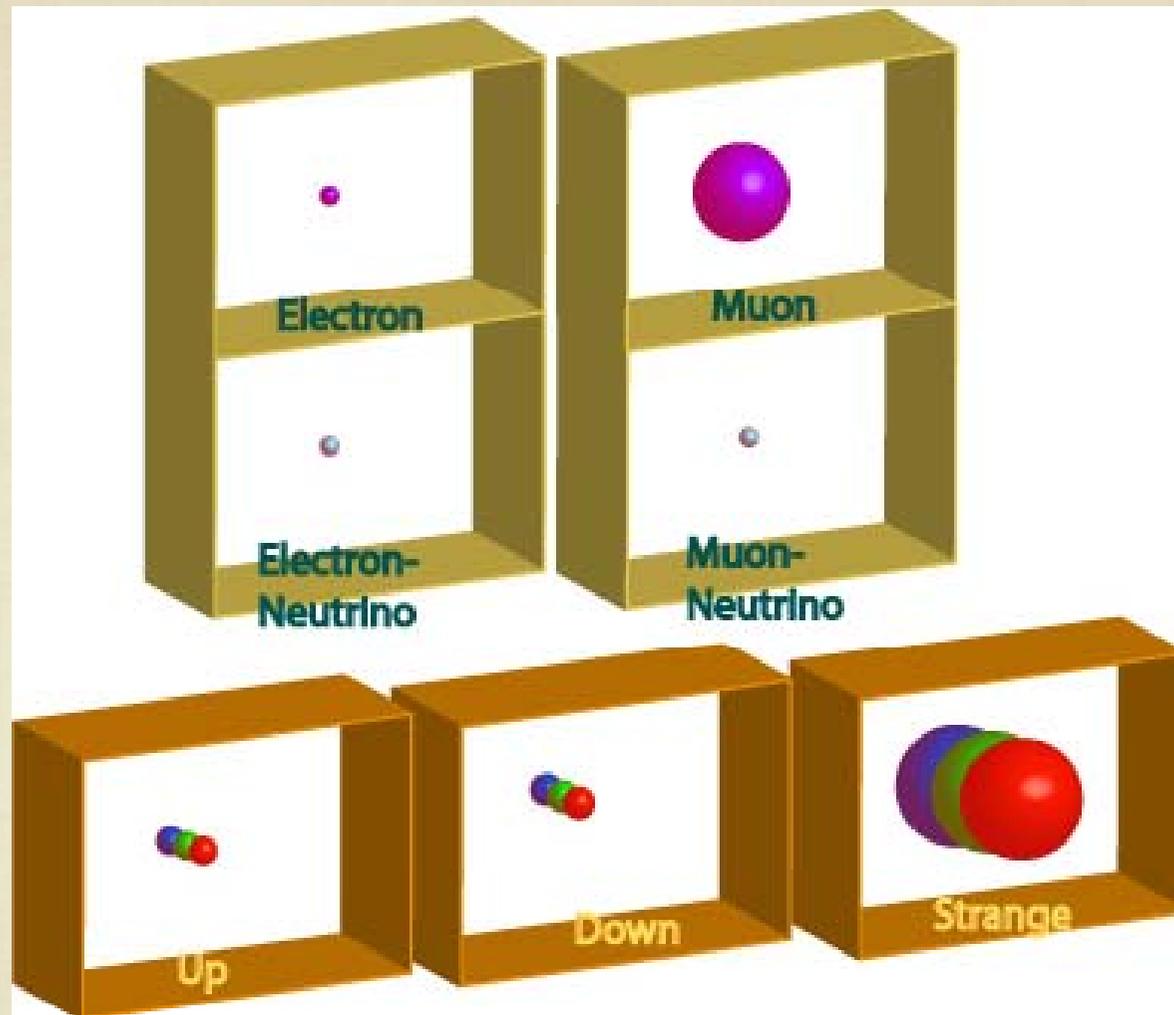
Selbstwechselwirkung der Gluonen

produziert ~ mit dem Abstand anwachsendes Potential

$$V_{QCD} = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$$

Bei sehr kleinen Abständen (oder sehr hohen Energien) nimmt die Stärke der Wechselwirkung ab.

LEPTONS



QUARKS

Gab es zwischen Elektronen/Muonen und Quarks einen Zusammenhang?
HINWEIS: 'elektroschwache' Wechselwirkung

Felder

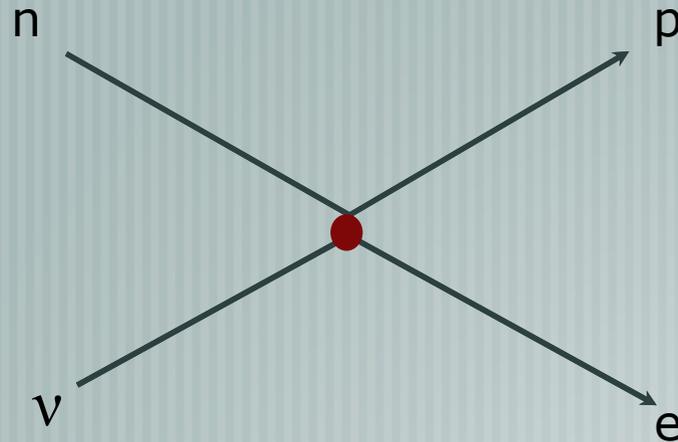
Elektroschwache WW

1958 Glashow

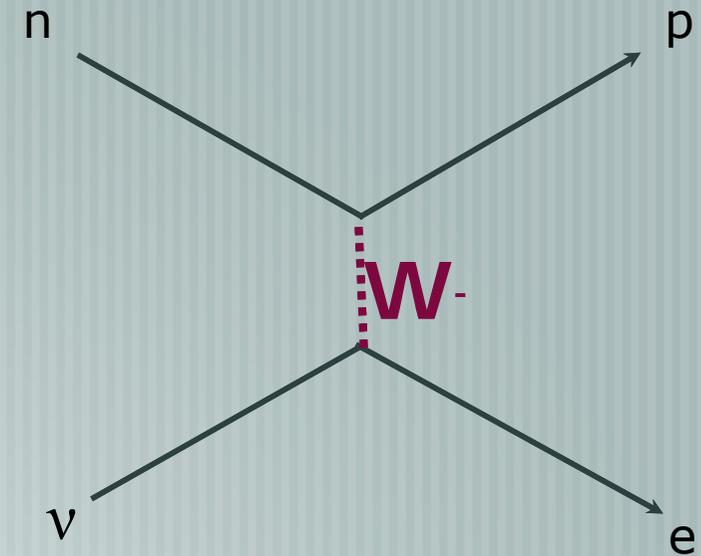
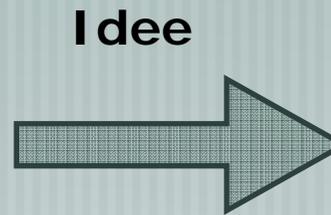
In den 50er gab es ein grosses (theoretisches) Problem

Neutrino-Proton Streuquerschnitt $\sim (G_F E_\nu)$
würde oberhalb 300 GeV die Unitarität verletzen*
(*Wahrscheinlichkeit > 100%)

$$G_F = (1/294 \text{ GeV})^2$$



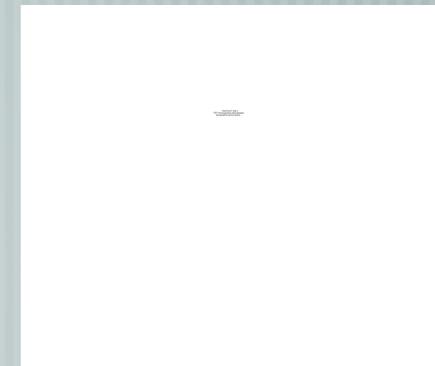
Fermi model



Glashow model

Die schwache Wechselwirkung wird durch den Austausch
sehr massiver 'Vektorbosonen' übertragen
(Analog zum Photonenaustausch!)

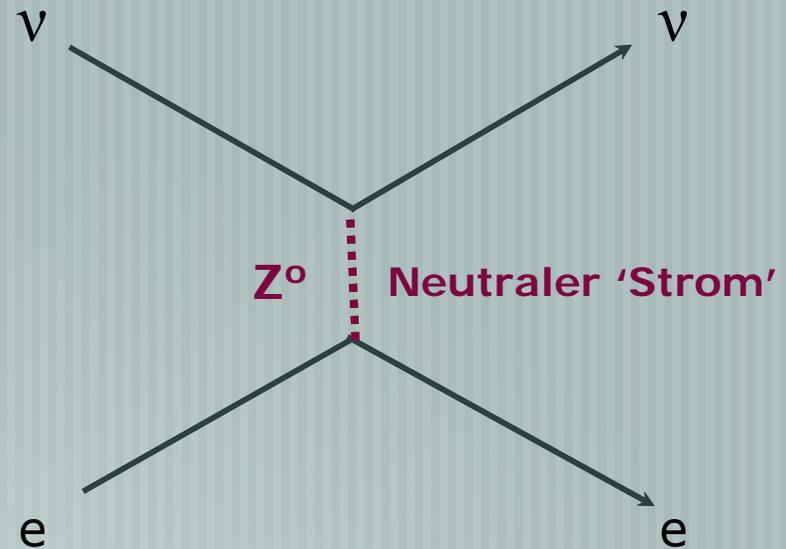
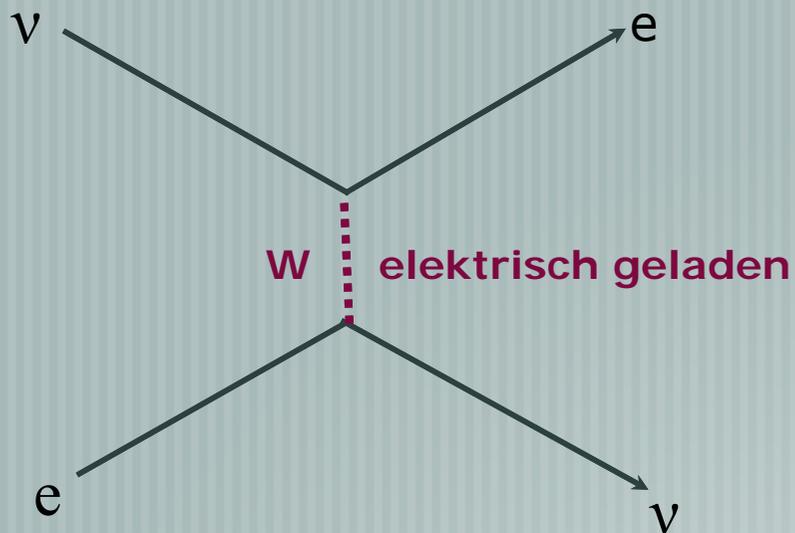
Die grosse Masse (80 GeV) würde die kurze
Reichweite ($2 \cdot 10^{-18}$ m) und den kleinen Streuquerschnitt
erklären



Fields

Electroweak Interaction

1968

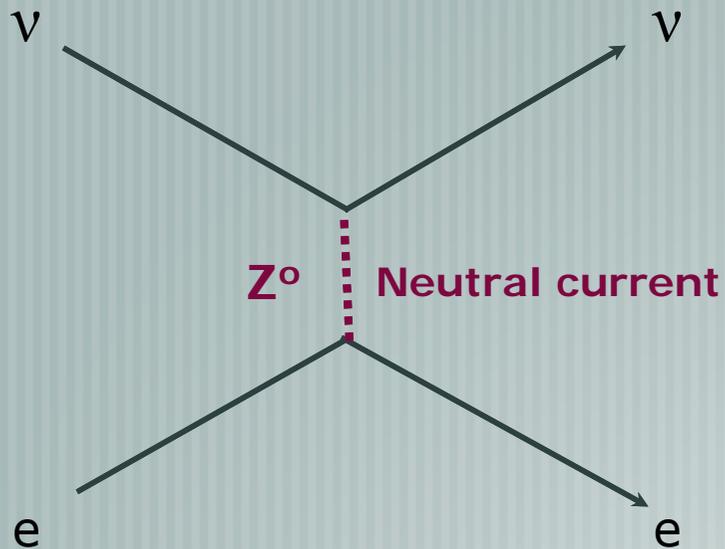


Glashow, Salam, Weinberg (1968)

Vereinigung der schwachen und der elektromagnetischen Wechselwirkung

- Die e.m. und schwache WW sind zwei Aspekte der gleichen 'elektroschwachen' WW
- Sowohl Quarks als auch Leptonen besitzen eine 'schwache' Ladung (i.e. Aussendung von W, Z)
- **W, Z Bosonen bekommen ihre Masse durch das Higgs-Feld (1964)**

Entdeckung neutraler Ströme am CERN (1973)



- Neutrino Strahl auf Blaskenkammer gerichtet
- Ein Elektron mit hoher Energie erscheint aus dem 'Nichts'

Nuclear Physics B73 (1974) 1–22 North-Holland Publishing Company

OBSERVATION OF NEUTRINO-LIKE INTERACTIONS WITHOUT MUON OR ELECTRON IN THE GARGAMELLE NEUTRINO EXPERIMENT

F.J. HASERT, S. KABE, W. KRENZ, J. VON KROGH, D. LANSKE, J. MORFIN, K. SCHULTZE and H. WEERTS
III. Physikalisches Institut der Technischen Hochschule, Aachen, Germany

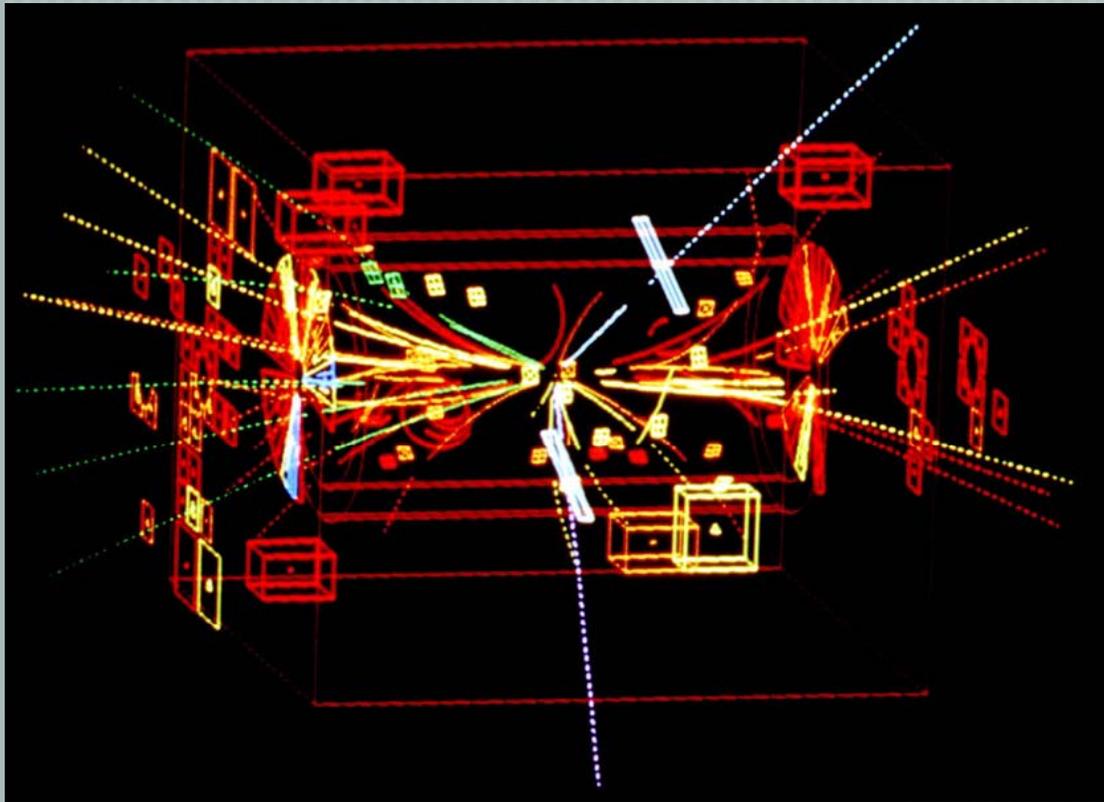
G. BERTRAND-COREMANS, J. SACTON, W. VAN DONINCK and P. VILAIN*
Interuniversity Institute for High Energies, U.L.B., V.U.B., Brussels, Belgium

R. BALDI, U. CAMERINI**, D.C. CUNDY, I. DANILCHENKO***, W.F. FRY**
D. HAIDT, S. NATALI†, P. MUSSET, B. OSCULATI, R. PALMER††,
J.B.M. PATTISON, D.H. PERKINS†, A. PULLIA, A. ROUSSET,
W. VENUS†† and H. WACHSMUTH
CERN, Geneva, Switzerland

V. BRISSON, B. DEGRANGE, M. HAGUENAUER, L. KLUBERG,
U. NGUYEN-KHAC and P. PETIAU
Laboratoire de Physique Nucleaire des Hautes Energies, Ecole Polytechnique, Paris France



Entdeckung der W und Z Bosonen am CERN (1983)



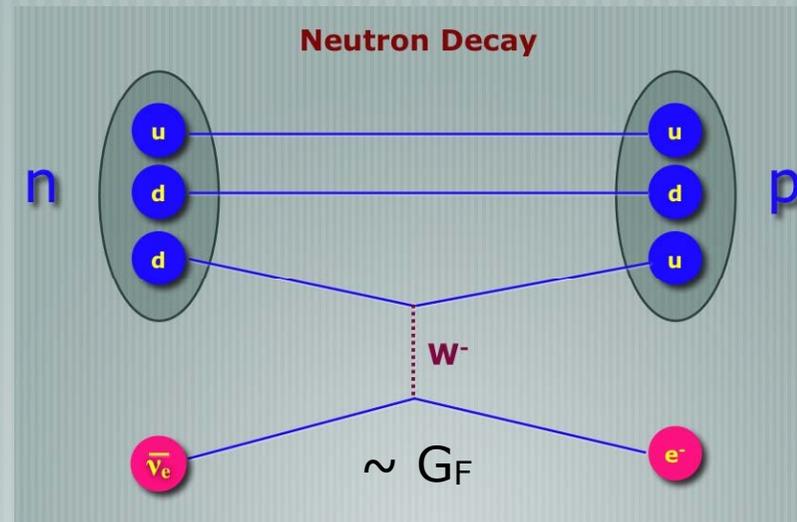
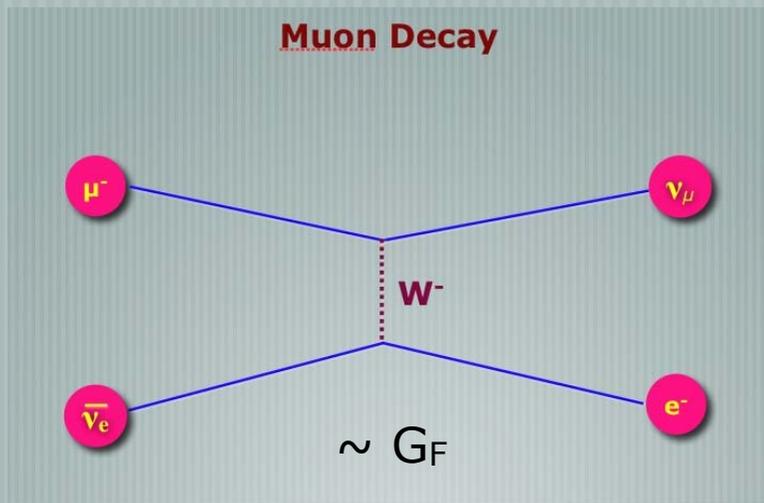
W Ereignis im UA-1 Detektor



Carlo Rubbia, Simon van der Meer

Fields

Die elektroschwache WW brachte auch einen Zusammenhang zwischen Leptonen und Quarks: sie haben die gleiche Wechselwirkungsstärke*



Konzept der elektroschwachen Ladung von Quarks und Leptonen
Übertragung durch Austausch von W und Z Bosonen

*Unter der Annahme das die verschiedenen Quark-Zustände etwas 'vermischt' sind

$$d' = d \cos \theta_c + s \sin \theta_c$$

$$s' = -d \sin \theta_c + s \cos \theta_c$$

$\theta_c = \text{Cabbibo angle} \sim 20^\circ$

Fields

1970

Eine der meistzitierten Publikationen (Glashow, Iliopoulos, Maiani)

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 2, NUMBER 7

1 OCTOBER 1970

Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry*

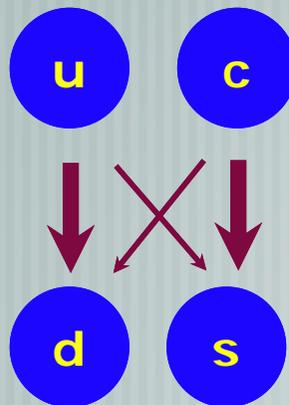
S. L. GLASHOW, J. ILIOPOULOS, AND L. MAIANI†

Lyman Laboratory of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02139

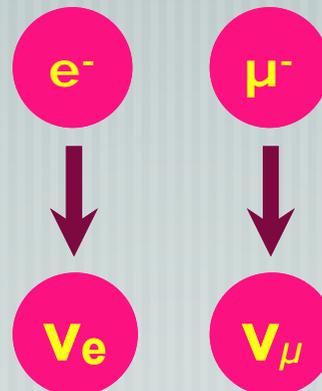
(Received 5 March 1970)

We propose a model of weak interactions in which the currents are constructed out of four basic quark fields and interact with a charged massive vector boson. We show, to all orders in perturbation theory, that the leading divergences do not violate any strong-interaction symmetry and the next to the leading divergences respect all observed weak-interaction selection rules. The model features a remarkable symmetry between leptons and quarks. The extension of our model to a complete Yang-Mills theory is discussed.

Quarks



Leptons

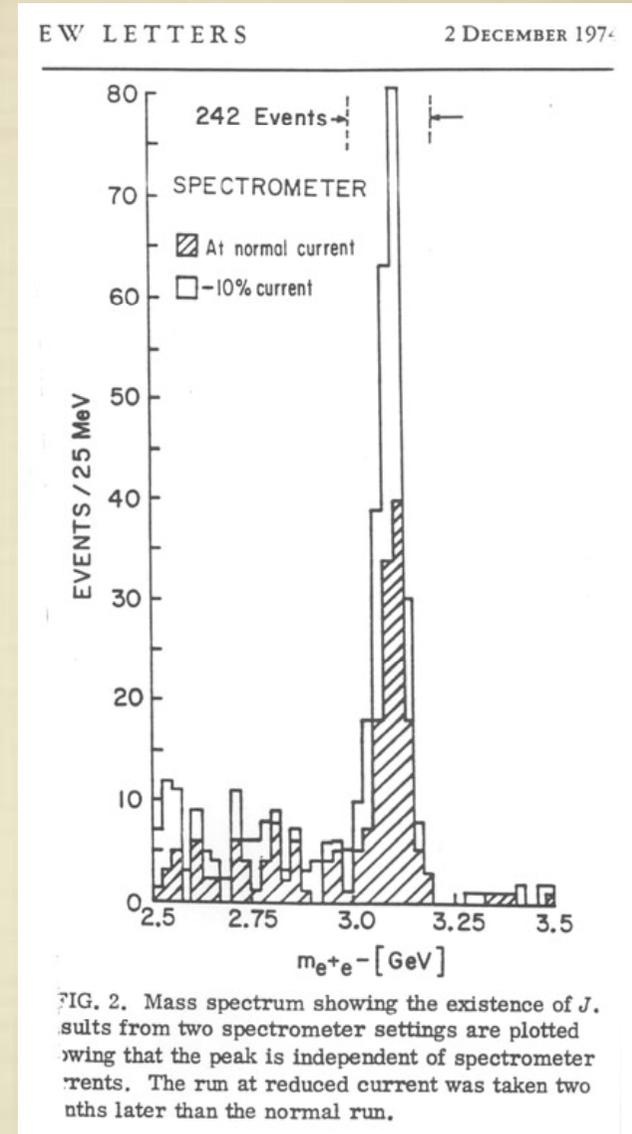
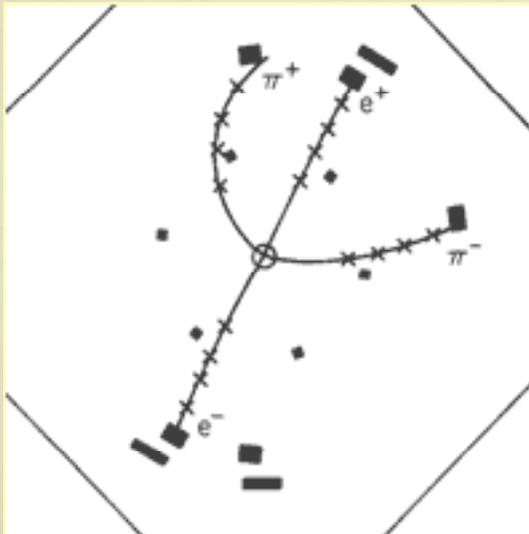


*Dies war das theoretische
'Standard'-Modell des
Jahres 1970 (mit zwei
Familien)*

Die Entdeckung des Charm-Quarks

NOVEMBER REVOLUTION (11 November 1974)

Zwei Gruppen entdeckten ~ simultan ein neues Teilchen. 'Psi' am SLAC (Burt Richter) und 'J' at Brookhaven (Sam Ting) - wurde dann J/Psi genannt.



Das J/psi Teilchen lebte 'sehr lange' ($\sim 10^{-20}$ sec). Es konnte nur über die elektroschwache Wechselwirkung zerfallen, meist in Zustände mit s-quarks. Seine lange Lebensdauer erklärt die schmale Resonanzlinie.